

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2024.04.018

某型复杂工程机械变速箱体复合工艺约束机加工线平衡研究*

金初云¹, 胡俊逸^{1,2*}, 陈 勇³, 王一鸿¹

(1. 浙江交通职业技术学院 轨道交通学院, 浙江 杭州 311112; 2. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031; 3. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要:为解决机加工生产线平衡问题所包含的加工任务刀具需求、机床类型需求、加工方位约束、“紧密”型和“或”型约束等复杂条件,建立了机加工生产线平衡数学模型,并采用含多重筛选机制的粒子群算法进行了求解。首先,建立了满足此复杂实际约束条件的机加工生产线平衡问题数学模型;然后,采用粒子的位置坐标作为粒子群搜索的权重信息,进行了加工任务、集中任务的选取,并设计了多重筛选机制构造启发式任务集生成规则;采用此规则对待分配加工任务进行了多重筛选,以得到可供直接分配的加工任务集合,粒子群算法(PSO)从此集合中依次选取了加工任务,构成了完整的解,并形成了具体的任务分配方案;最后,为提高程序的实用性和可视性,设计了加工任务的甘特图生成模块,通过对某复杂工程机械变速箱体零件的实际案例研究,将简化后的任务信息代入算法进行了求解。研究表明:该方法实现了多组平衡率高于90%的优化结果,在节拍时间为1120 s时,得到94.66%的较高平衡率,排产方案表格内容与甘特图显示一致;算法推演结果满足设定的多种复合约束条件,通过与人工排产对比说明了该算法的有效性并具有良好的经济性、实用性;对柔性生产案例进行探讨,证明该算法运算结果具备一定的生产柔性。

关键词:机械加工工艺;粒子群算法;生产线平衡数学模型;箱体类零件;约束关系矩阵;启发式备选任务集生成规则

中图分类号:TH165;TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2024)04-0720-12

Machining line balance of variable speed box of a complex construction machinery considering complex process constraints

JIN Chuyun¹, HU Junyi^{1,2}, CHEN Yong³, WANG Yihong¹

(1. Rail Transit Department, Zhejiang Institute of Communications, Hangzhou 311112, China; 2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: To solve the balance problem of machining production, complex conditions such as machining task tool requirements, machine tool type requirements, machining orientation constraints, "tight" type and "or" type constraints are included. A mathematical model of this complex problem was constructed, and a particle swarm optimization algorithm with multiple screening mechanism was proposed to solve it. Firstly, a mathematical model of the balance problem of machining production line was established which satisfied the complex practical constraints. Then, the position coordinates of particles were used as the weight information of particle swarm search to select the tasks in the processing task set, and a multi-screening mechanism was designed to construct the heuristic task set generation rule. This heuristic task set generation rule was used to get a set of processing tasks that could be directly assigned and processed. The processing tasks were selected successively by particle swarm optimization (PSO) from the directly selectable set to form a complete solution and a specific task assignment scheme. Finally, in order to improve the practicability and visibility of the program, a Gantt chart generating module for machining task was designed. Through the actual case study of a complex construction machinery variable speed box parts, the simplified task information was

收稿日期:2023-08-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52375268);浙江省公益基金资助项目(LGG22G010002);四川省科技计划项目(2022YFG0245, 2022YFG0241);浙江省2022年度访工项目(FG2022009)

作者简介:金初云(1977-),女,浙江慈溪人,硕士,副教授,主要从事机械制造方面的研究。E-mail:jinchuyun@zjvtit.edu.cn

通信联系人:胡俊逸,男,博士研究生,副教授。E-mail:hujunyi_jt@zjvtit.edu.cn

substituted into the algorithm to solve the optimization results. The research results indicate that this method has achieved optimization results with multiple balance rates above 90%. When the beat time is 1 120 s, the balance rate is 94.66%, and the content of the production scheduling table is consistent with the Gantt chart. The proposed algorithm satisfies the complex constraints, and the comparison with manual scheduling shows that the proposed algorithm is effective and has good economy and practicability. Through the discussion of flexible production cases, the results of this algorithm have certain production flexibility.

Key words: machining technology; particle swarm optimization (PSO); line balancing mathematical model; box parts; constraint relation matrix; heuristic alternative task set generation rules

0 引言

当前以加工中心、车铣复合、多轴联动等高端制造设备为主的柔性生产线可胜任绝大多数复杂零件的机械加工工序。而在多台柔性机床构成的生产线中,往往存在耗时较长的瓶颈工序。承担瓶颈工序的机床决定了整条生产线的节拍,并影响了高端柔性生产线的产能发挥^[1-2]。因此,如何平衡分配零件的加工任务至多台机床中,使得每台机床所分配的加工任务平均化,消除瓶颈工序,一直是困扰加工制造业的难题之一。

针对典型复杂零件的工序平衡化分配问题展开研究具有重要的意义。

制造类生产线可分为装配/拆卸工艺类、机械加工类以及石化冶金流程工业类三种。对于装配/拆卸线平衡问题已有学者进行了较多研究。张则强等人^[3-7]将智能优化算法应用于装配/拆卸线平衡研究领域,且获得较好的成效。而当前针对机械加工类的生产线问题,往往集中于加工任务所形成的最短有效任务链的研究,如文笑雨等人^[8]和张雷等人^[9]分别研究了最短机加工任务链构建问题,以及在此基础上考虑减少换刀次数,机床工位翻转次数等附加加工辅助过程的复杂问题。通过 OSMAN H 等人^{[10]1350}和张恒等人^{[11]2504}的研究成果得知,机加工生产线平衡问题(transfer line balancing problem, TLBP)是在加工任务链规划基础上的后续优化。

针对该问题,国外有较少的学者进行了研究。BORISOVSKY P 等人^[12]研究了包含紧密和禁忌约束以及任务切换时间的机加工生产线平衡问题;但 BORISOVSKY P 等人未考虑机床类型需求。ESSAFI M 等人^[13]以最小化工位数量为优化目标,进行了机加工生产线平衡问题的研究;ESSAFI M 等人虽考虑了机床类型需求,但未考虑紧密型和“或”型约束条件。OSMAN H 等人^{[10]1345}考虑了刀具需求和机床类型需求,以最小化加工辅助时间(如换刀时间、等待时间)为优化目标,同时将加工任务均衡的分配到各个工位

中,并采用一种蚁群算法进行了求解;但 OSMAN H 等人未考虑任务之间的紧密型和“或”型约束。

国内也有学者对此问题进行了研究,已取得一定的成果。李爱平等人^[14]以零件装夹定位方案为加工要素的聚类约束,并考虑换刀、转位等加工辅助要素,采用蚁群算法进行了优化改进;但未考虑“或”型约束。章正伟^[15]提出了更贴近实际情况的“或”型约束以完善现有的工艺约束矩阵,同时也采用蚁群算法进行了求解;但未考虑机床类型需求。张恒等人^{[11]2501}针对零件族类提出了一种混流零件生产线平衡问题的改进遗传算法;但未考虑聚类、“或”型等实际约束。刘雪梅等人^[16]采用改进遗传算法研究了零件生产线平衡多目标优化问题;但未考虑“或”型约束。胡俊逸等人^[17]首次提出了首尾加工辅助要素的概念,并采用蚁群算法求解了综合考虑紧密型和“或”型约束的机加工生产线平衡问题;但其提出的数学模型并未考虑加工任务的机床类型需求。

现有方法以定位装夹为聚类准则,以加工约束矩阵为加工任务先后约束关系,以蚁群或遗传算法求解机加工生产线平衡问题。但在约束条件的设置角度,或仅考虑换刀、转位等辅助要素,或仅考虑增加“或”型约束来改善任务约束矩阵,未能将两者综合;且未综合考虑加工方位、机床类型、紧密约束等多种约束条件,因此限制了优化结果在实践中的应用。

笔者在引入文献[14]考虑换刀辅助要素,文献[15]的“或”型约束条件基础上,同时考虑机床类型需求、紧密约束、加工方位约束,以节拍和平衡率为优化目标,研究一种基于可行任务选集的粒子群算法来满足多种复杂的约束条件,同时以某型复杂箱体为算例,验证该算法的实用性。

1 机加工生产线平衡工艺约束定义

1.1 约束关系矩阵

在机械加工中,完成一个尺寸要素的加工往往需要多个工步,如粗加工、半精加工、精加工等。

为简化问题求解难度,笔者将某一尺寸要素的连

贯性加工工步整合为一个工步(将粗刀换精刀等辅助时间统计在内),同时这也符合实际操作中钻铰孔、钻镗孔、孔钻攻丝、粗精铣面、钻深长孔工步组合等情形^[15],也符合现今复合丝锥、钻铰刀等复合刀具大量应用的情形。

在此基础上,可提出所有加工要素之间的工艺先后约束关系矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

若尺寸要素 i 加工完毕之后,尺寸要素 j 才允许被加工,则 $a_{ij} = 1$;若尺寸要素 i 或尺寸要素 k 任意一个加工完毕之后,尺寸要素 j 均可允许被加工,则 $a_{ij} = a_{kj} = 2$,即“或”型约束^[16],若 i 或 k 之一被加工,则另一要素与 j 的先后约束关系失效,可设置为 -1 ;若尺寸要素 i 加工完毕之后,必须立即加工尺寸要素 j ,则 $a_{ij} = -2$,即 i 与 j 为紧密约束;若尺寸要素 i 与尺寸要素 j 之间并无任何先后约束关系,则 $a_{ij} = 0$ 。

综上所述, a_{ij} 的可能取值如下: $a_{ij} = (-2, -1, 0, 1, 2)$ 。

相比于文献[1,9-14],增加“或”型约束后,其改善了先后约束关系矩阵,为任务编排提供更多可能^[15];相比于文献[15],其增加紧密约束后使得在编排如一面两销等多定位基准要素时,使之优先安排在同一工位中,更符合先加工定位基准/尺寸评价基准要素,后加工被评价尺寸要素的工艺编排原则。

同时,增加考虑了加工方位约束、刀具类型需求约束、机床类型需求约束,也更加符合机加工生产线现场实际情形。

1.2 机加工生产线平衡数学模型

某零件所有加工任务之间的先后顺序约束有向图如图 1 所示。

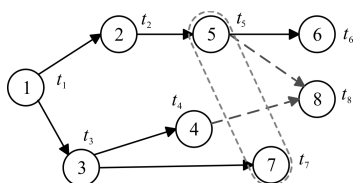


图 1 复合约束加工工艺有向图

Fig.1 Directed graph of composite constrained machining process

圆圈内的数字表示任务序号,两个任务之间的先后顺序约束用实线箭头;两个任务之间的“或”型约束采用虚线箭头;用虚线框将紧密约束要素包围。如:任

务 1 和 2 为正常先后关系约束,则 $a_{12} = 1$;任务 8 和 4、8 和 5 为“或”型约束关系,则 $a_{58} = a_{48} = 2$;任务 5 和 7 为紧密约束关系,则 $a_{57} = -2$;任务 2 和 3 之间没有任何约束关系,则 $a_{12} = 0$ 。

图 1 表示的某零件的机加工产线示意图如图 2 所示。

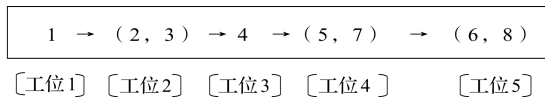


图 2 一种满足图 1 的 5 工位工艺编排方案

Fig.2 A 5-station process layout scheme satisfying Fig.1

图 2 表示机加工产线由 5 个工位组成,每个工位包含多个加工要素,被加工零件在工位中在一次定位装夹后完成本工位所有加工要素的加工任务,零件依次在后续工位中流转,直到完成所有加工内容。箭头表示加工工件在不同工位之中的流动顺序;括号表示将多个任务安排在同一工位中;工位 1 和工位 3 都仅安排了一个加工任务,其余工位均安排了多个加工任务。在图 2 所示的编排方案中,若假设在任务 5 和任务 7 未安排时就优先安排任务 8 在工位 4,也是可行的,因当任务 4 安排之后, $a_{48} = a_{58} = -1$,任务 8 的约束关系被释放,因此任务 8 可自由分配。

因任务 2 和任务 3 所用加工刀具不同,则要在两个任务之间插入换刀时间;且还需满足加工方位限制。

该零件满足图 1 和图 2 约束关系的工艺编排甘特图如图 3 所示。

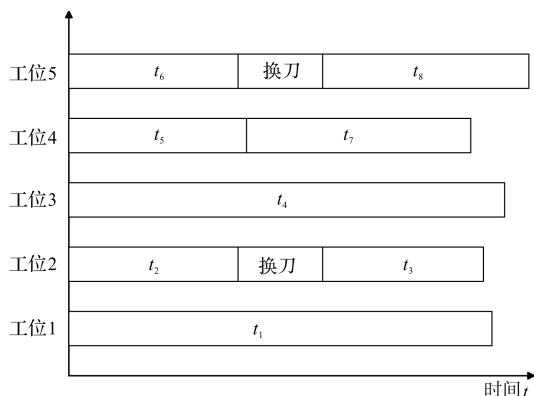


图 3 满足图 1 和图 2 约束的 5 工位工艺编排甘特图

Fig.3 Gantt diagram of 5-station process arrangement satisfying the constraints of Fig.1 and Fig.2

图 3 表示同一个工件依次在不同工位中按顺序流转,每个工位的加工时间由当前工位对应的加工任务 i 的加工时间 t_i 来决定,且当同个工位包含多个加工任务时,还需考虑不同加工任务所需刀具差异所带来的换刀时间。图 2 所示的编排方案仅是一种可能,任何满足矩阵约束 A 的编排方案均具备可行性。而在实

际情形中,每个工位的最长操作时间即节拍时间 C 是影响加工效率的最关键因素,是不可忽视的约束条件。

因此,有必要通过数学模型对多种约束条件的定义来约束算法的设计,从而保证任务编排过程可满足多种约束条件,实现编排方案的可行性。

含换刀、生产准备任务等辅助工步的机加工生产线的平衡问题数学模型如下所示:

表示要素只能被分配到某一个工位,不可重复分配,公式如下:

$$S_x \cap S_y = \Phi \quad x \neq y \quad x, y = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中: S_x, S_y 分别为工位 x 、工位 y ; Φ 为空集; m 为工位数量。

表示所有要素均要归属于某一工位,不可出现遗漏,公式如下:

$$\bigcup_{k=1}^m S_k = \Omega \quad (3)$$

式中: S_k 为工位 k 。

表示每个工位中加工要素累计时间的求和项与换刀累计时间 ($c_k \times p_h$) 之和应小于节拍时间 C , 公式如下:

$$T_k \leq C, k = 1, 2, \dots, m; T_k = \sum_{i \in S_k} t_i + c_k \times p_h \quad (4)$$

式中: T_k 为工位 k 的累计时间总和; c_k 为工位内换刀次数; p_h 为平均换刀时间。

表示要素分配过程的常规先后约束如下:

$$\forall i \in S_x, j \in S_y \text{ 若 } a_{ij} = 1 \text{ 则 } x \leq y \quad (5)$$

表示“或”型约束如下:

$$\forall i \in S_x, j \in S_y \text{ 若 } a_{ij} = 2 \text{ 则 } x \leq y \quad (6)$$

表示紧密约束如下:

$$\forall i \in S_x, j \in S_y \text{ 若 } a_{ij} = -2 \text{ 则 } x = y \quad (7)$$

表示任务的加工方位约束如下:

$$\forall i, j \in S_x, o_i = o_j \quad (8)$$

表示任务的加工机床类型约束如下:

$$\forall i, j \in S_x, e_i = e_j \quad (9)$$

表示工位要素集合如下:

$$S_k = \{i | i \in S_k\} \quad (10)$$

表示全体要素集合如下:

$$\Omega = \{1, 2, \dots, n\} \quad (11)$$

式中: n 为要素总数。

平衡率如下:

$$LB = (\sum_{i \in \Omega} t_i) / (C \times m) \quad (12)$$

式中: LB 为平衡率。

最大化平衡率目标函数如下:

$$F_1 = \text{Max}(LB) \quad (13)$$

最小化工位数量目标函数如下:

$$F_2 = \text{Min}(m) \quad (14)$$

最小化换刀次数目标函数如下:

$$F_3 = \text{Min}(C_h = \sum_{k=1}^m C_k) \quad (15)$$

笔者利用以上模型对文献[15]中有关“或”型约束释放后的情形进行了补充定义,同时相对文献[17]增加了机床类型约束和加工方位约束,这样更加复合实际工艺编排的多种约束类型。

但在模型中,节拍时间 C 将影响任务在不同工位中的分配结果,同时当改变两个任务前后顺序时(假设改变后仍然满足矩阵 A 的约束),由于任务所需刀具型号的差异,又将引起换刀时间的变化。

因该问题是逻辑较为复杂的非线性问题,更适合采用启发式算法求解。

2 机加工生产线平衡粒子群算法

2.1 含启发式任务筛选规则粒子群算法流程

常用的元启发式算法有遗传算法、粒子群算法等。笔者研究的任务排序问题是具有较多强互关性的约束条件,若采用遗传算法的随机交叉和变异算子,任务在序列中(各工位之间)随机位移将破坏任务所属机床类型、加工方位等约束条件,易导致不可行解的产生,限制算法进化效率。若在构造加工任务序列过程中通过改变任务的被选概率的方法进行迭代优化,且避免任务序列间随机交叉对可行序列的随机破坏,则可保证任务序列的可行性。

因此,采用基于任务选择权值的元启发式算法具有更多的便利,粒子群算法成为求解该问题的优选。

相对于文献[15]和[17],笔者分别增加了刀具类型和机床类型约束,兼顾先后顺序、“或”型约束和紧密约束特殊情况,同时考虑换刀增加的工位总耗时。

整体算法流程图如图4所示。

图4中,在构建加工任务链的每一步搜索过程中,需综合考虑以上约束条件,建立待搜索要素集合。因此,构建时间约束集合生成模块、机床类型约束模块、加工方位约束集合生成模块、刀具约束集合生成模块、紧密约束集合生成模块,将其作为启发式规则以满足约束条件。

2.2 启发式备选任务集生成规则

相对于文献[15]和文献[17],改进后的流程保证所生成的加工任务链满足各种复杂约束条件。

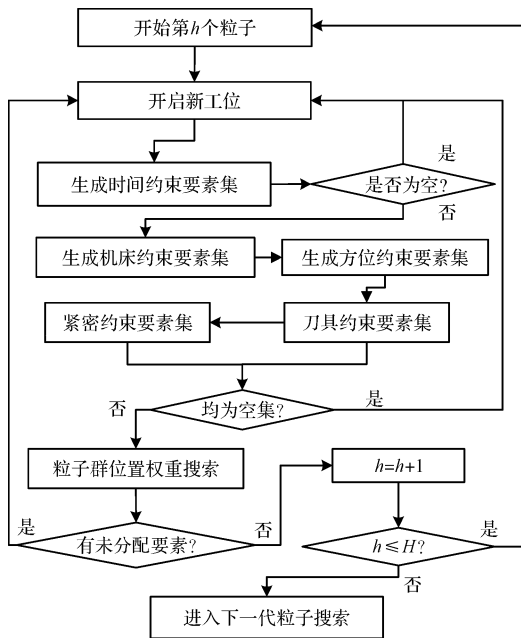


图 4 含启发式规则粒子群算法流程

Fig. 4 Process of particle swarm optimization with heuristic rules

具体步骤为:利用粒子群算法构成要素序列,在第 s 步均将生成候选任务集;然后采用粒子群中粒子位置向量作为待加工任务的被选择权重的规则来选择待加工任务,直到完成 n 个任务的选择,形成完整的任务加工链。

1) 时间约束规则。综合考虑“或”型约束,以及常规先后关系约束、节拍时间约束;判断某任务 j 是否可加入初始可供选择任务集合的流程为:

① 令当前工作站为 k , 令 $Q_j = \{i | a_{ij} = 1 \text{ 或 } a_{ij} = 2 \text{ 或 } a_{ij} = -2\}$, 且 $Q_j \in \cup_{h=1}^k S_h$ 成立,说明任务 j 的所有前序任务均已被分配,则进入下一步;

② 设当前工作站 k 的安排任务完成时间为 t_{temp} , 则根据节拍时间 C 约束初步筛选得到以下候选任务集合 $D_s = \{j | t_{\text{temp}} + t_j \leq C\}$;

2) 机床约束规则。综合考虑当前工作站 k 的机床型号,与待分配任务 j 所适用的机床型号的差异,从而考虑机床类型匹配,对 1) 中的时间约束集 D_s 做进一步筛选;

3) 方位约束规则。综合考虑当前工作站 k 的机床加工任务时的零件方位,与待分配任务 j 所适用的加工方位的差异,从而考虑加工方位一致性,对 1) 中的时间约束集 D_s 做进一步筛选;

4) 刀具约束规则。综合考虑当前工作站 k 的刀塔刀具,与待分配任务 j 所用刀具的差异,从而考虑换刀时间,对 1) 中的时间约束集 D_s 做进一步筛选;

① 若 j 与当前工作站中前一任务所需刀具相同,

则需不考虑刀具准备时间 p_h ;

② 若 j 与当前工作站中前一任务所需刀具不同,则需考虑换刀时间 p_h ;

③ 综合以上情况,得到符合刀具约束的集合 T_s ;

5) 在以上步骤基础上,进一步考虑紧密约束条件,生成紧密约束集合 J_s ; 并采用基于任务所对应粒子位置权重进行任务的最终选择。

2.3 粒子群算法的任务选择过程

粒子群优化(PSO)算法采用粒子位置权值赋予待搜索变量,采用速度向量赋予变量变化趋势,搜索过程简单高效,在科学研究和工程应用方面比较有优势^[18-21]。

笔者保留标准粒子群算法核心算子,以粒子位置权值赋予任务选择权值,以粒子速度赋予任务选择权值的变化趋势,从而将粒子群算法较好地融入问题求解过程,以启发式备选任务集生成规则约束任务链,从而保证其可行性。

粒子群算法的速度向量 $V_i^{(k)}$ 和位置向量 $\tilde{P}_i^{(k)}$ 更新方法如下:

$$V_i^{(k+1)} = \sigma V_i^{(k)} + \rho_1 r_1 (\tilde{P}_{i,\text{pbest}}^{(k)} - \tilde{P}_i^{(k)}) + \rho_2 r_2 (\tilde{P}_{i,\text{gbest}}^{(k)} - \tilde{P}_i^{(k)}) \quad (16)$$

$$\tilde{P}_i^{(k+1)} = \tilde{P}_i^{(k)} + V_i^{(k+1)} \quad (17)$$

式中: ρ_1, ρ_2 为每个粒子个体向自身经验和全局经验借鉴的系数,一般可设 $\rho_1 = \rho_2 = 2$; $\tilde{P}_i^{(k)}$ 为第 i 个粒子在第 k 次迭代时所处的位置; $\tilde{P}_{i,\text{pbest}}^{(k)}$ 为第 i 个粒子在 k 次迭代后的自身最优经验位置; $\tilde{P}_{i,\text{gbest}}^{(k)}$ 为整粒子群群体经历 k 次迭代后所到达的最优经验位置; $V_i^{(k)}, V_i^{(k+1)}$ 为第 i 个粒子在第 k 次和第 $k+1$ 次迭代时刻的运动速度; r_1, r_2 为随机数,取值(0,1),体现粒子受个体和全局经验影响的随机性; σ 为粒子沿着自身运动方向移动的惯性系数。

以 $\tilde{P}_i^{(k)}$ 为任务 i 在第 k 次迭代时刻的选择权值,而启发式备选任务集中每个备选任务的选择权值大小体现该任务在任务链当前位置处的被选中概率。

3 某箱体机加工工艺平衡编排案例

3.1 某型工程机械变速箱体的评价基准分析

某型工程机械变速箱体^[17]的关键评价基准要素示意图如图 5 所示。

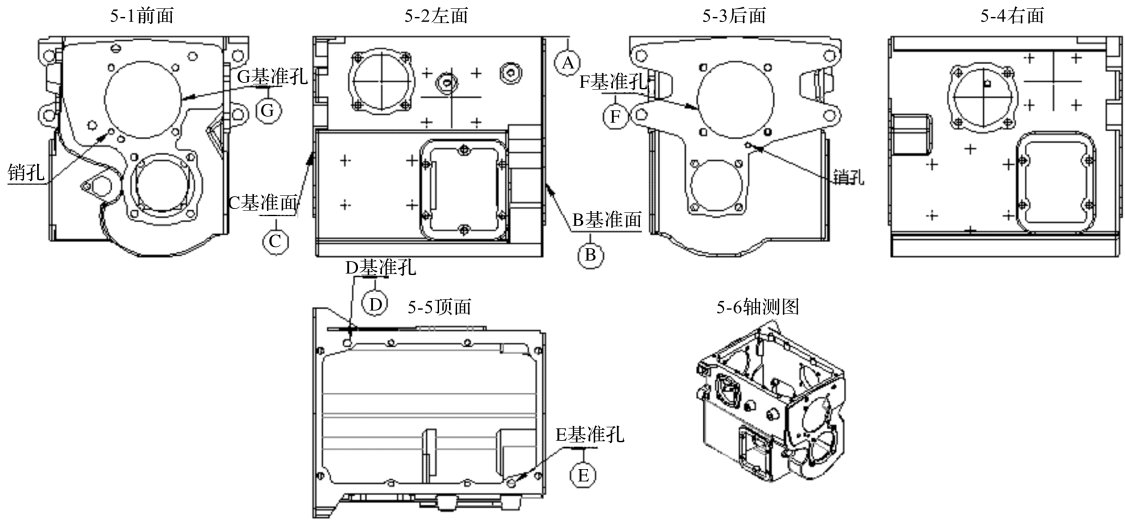


图 5 某型箱体关键评价基准三视图

Fig. 5 Three views of key evaluation criteria for a certain type of box body

图 5 中,B、G 基准以 A、D、E 基准为评价要素,C、F 基准以 B、G 基准为评价要素;由此可知,A、D、E 基准最为重要,因安排在首道工序加工,且为保证 A、D、E 之间相互位置精度,应设置为紧密约束集(由一次装夹定位后在同一个工位中一起加工,因此由机床自身精度来保证 A、D、E 之间的相互位置精度);同理,B、G 基准也必须安排在同一道工序加工,因此也设置为紧密约束。

因 C、F 基准为自身所在平面上加工要素的评价基准,因此,以上情况同样适用于基准 C、F。

3.2 箱体加工工艺分析

图 5 所示箱体的 73 个机加工要素,分别归属于零件的顶面、左右侧面、前面、后面。由于核心评价基准 A、D、E 位于顶面,因此在安排工序时将 A、D、E 的加工放在首位。

由于 B、G 基准位于零件的前面,且以 A、D、E 基准为评价要素,因此可以 A、D、E 基准作为定位基准来加工 B、G 基准;同理,C、F 基准既可由 A、B、E 也可由 B、G 基准作为定位基准来加工。

73 个加工任务之间的优先顺序约束关系如图 6 所示。

由图 6 可以看出:由于各基准之间的加工先后顺序约束,导致与以上基准归集于同一加工方位的各加工任务之间便自然继承了各基准之间的先后约束关系;同时,一般可将位于被加工面上的所有加工孔要素归集为此加工面的紧后加工任务;根据以上两点原则,可将此箱体零件的 73 个被加工要素编制出加工顺序约束有向图。如任务 3 和 8、12 和 13、30 和 31 之间为紧密型约束,则这些成对任务必须安排在同一个工位

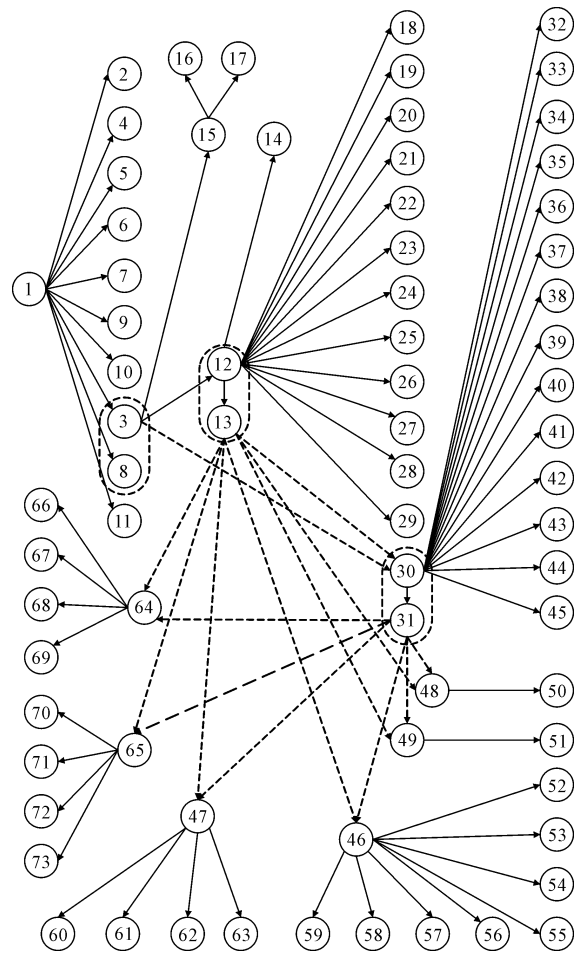


图 6 加工约束关系图

Fig. 6 Processing constraint diagram

中完成。

任务 3 和 13 为任务 30 的“或”型约束,任务 13 和 31 为任务 46、任务 47、任务 48、任务 49、任务 64、任务 65 的“或”型约束,则只要任务 13 和 31 之间任何一个完成加工,后续的任务 46 ~ 49、64、65 均可被安排。

每个任务的加工方位约束和加工机床类型约束如表 1 所示。

表 1 任务操作工序及时间

Table 1 Task operation procedure and time

| 序号 | 加工要素 | 时间 /s | 所属加工面 | 刀具型号 | 零件方位 | 机床 |
|----|------------|-------|-------|--------------|------|----|
| 1 | A 基准面 | 955 | A 基准 | φ30 铣刀 | 顶面 | M |
| 2 | A 面 φ10 孔 | 5 | A 基准 | φ10 复合丝锥 | 顶面 | M |
| 3 | φ12(D 基准) | 8 | A 基准 | φ12 钻铰刀 | 顶面 | M |
| 4 | A 面 φ8 孔 | 2 | A 基准 | φ8 复合丝锥 | 顶面 | M |
| 5 | φ8 孔深 20 | 2 | A 基准 | φ8 复合丝锥 | 顶面 | M |
| 6 | A 面 φ10 孔 | 5 | A 基准 | φ10 复合丝锥 | 顶面 | M |
| 7 | A 面 φ10 孔 | 5 | A 基准 | φ10 复合丝锥 | 顶面 | M |
| 8 | φ12(E 基准) | 8 | A 基准 | φ12 钻铰刀 | 顶面 | M |
| 9 | A 面 φ8 孔 | 2 | A 基准 | φ8 复合丝锥 | 顶面 | M |
| 10 | A 面 φ8 孔 | 2 | A 基准 | φ8 复合丝锥 | 顶面 | M |
| 11 | A 面 φ10 孔 | 5 | A 基准 | φ10 复合丝锥 | 顶面 | M |
| 12 | B 基准面 | 740 | B 基准 | φ50 铣刀 | 前面 | M |
| 13 | G 基准孔 | 97 | C 基准 | φ50 铣 φ120 镗 | 前面 | M |
| 14 | B 面 φ100 孔 | 83 | C 基准 | φ50 铣 φ100 镗 | 前面 | M |
| 15 | 凹台 | 61 | 凹台 | φ50 铣刀 | 前面 | M |
| 16 | φ30 凹台孔 | 33 | 凹台 | φ30 铣刀 | 前面 | M |
| 17 | φ10 凹台孔 | 5 | 凹台 | φ10 钻头 | 前面 | M |
| 18 | B 面 φ11 孔 | 6 | B 基准 | φ11 复合丝锥 | 前面 | M |
| 19 | B 面 φ11 孔 | 6 | B 基准 | φ11 复合丝锥 | 前面 | M |
| 20 | B 面 φ11 孔 | 6 | B 基准 | φ11 复合丝锥 | 前面 | M |
| 21 | B 面 φ11 孔 | 6 | B 基准 | φ11 复合丝锥 | 前面 | M |
| 22 | B 面 φ10 孔 | 5 | B 基准 | φ10 复合丝锥 | 前面 | M |
| 23 | B 面 φ10 孔 | 5 | B 基准 | φ10 复合丝锥 | 前面 | M |
| 24 | B 面 φ10 孔 | 5 | B 基准 | φ10 复合丝锥 | 前面 | M |
| 25 | B 面 φ10 孔 | 5 | B 基准 | φ10 复合丝锥 | 前面 | M |
| 26 | B 面 φ8 孔 | 2 | B 基准 | φ8 复合丝锥 | 前面 | M |
| 27 | B 面 φ13 孔 | 5 | B 基准 | φ13 复合丝锥 | 前面 | M |
| 28 | B 面 φ13 孔 | 5 | B 基准 | φ13 复合丝锥 | 前面 | M |
| 29 | B 面 φ13 孔 | 5 | B 基准 | φ13 复合丝锥 | 前面 | M |
| 30 | C 基准面 | 824 | C 基准 | φ50 铣刀 | 后面 | M |
| 31 | F 基准孔 | 97 | C 基准 | φ50 铣 φ120 镗 | 后面 | M |
| 32 | C 面 φ100 孔 | 83 | C 基准 | φ50 铣 φ100 镗 | 后面 | M |
| 33 | C 面 φ11 孔 | 6 | C 基准 | φ11 复合丝锥 | 后面 | M |
| 34 | C 面 φ11 孔 | 6 | C 基准 | φ11 复合丝锥 | 后面 | M |
| 35 | C 面 φ11 孔 | 6 | C 基准 | φ11 复合丝锥 | 后面 | M |
| 36 | C 面 φ11 孔 | 6 | C 基准 | φ11 复合丝锥 | 后面 | M |
| 37 | C 面 φ11 孔 | 6 | C 基准 | φ11 复合丝锥 | 后面 | M |
| 38 | C 面 φ11 孔 | 6 | C 基准 | φ11 复合丝锥 | 后面 | M |
| 39 | C 面 φ11 孔 | 6 | C 基准 | φ11 复合丝锥 | 后面 | M |
| 40 | C 面 φ11 孔 | 6 | C 基准 | φ11 复合丝锥 | 后面 | M |
| 41 | C 面 φ8 孔 | 2 | C 基准 | φ8 复合丝锥 | 后面 | M |
| 42 | C 面 φ17 孔 | 8 | C 基准 | φ17 复合丝锥 | 后面 | M |
| 43 | C 面 φ17 孔 | 8 | C 基准 | φ17 复合丝锥 | 后面 | M |
| 44 | C 面 φ17 孔 | 8 | C 基准 | φ17 复合丝锥 | 后面 | M |
| 45 | C 面 φ17 孔 | 8 | C 基准 | φ17 复合丝锥 | 后面 | M |

续表

| 序号 | 加工要素 | 时间 /s | 所属加工面 | 刀具型号 | 零件方位 | 机床 |
|----|----------|-------|-------|----------|------|----|
| 46 | 右侧方窗 | 379 | 右方窗 | φ50 铣刀 | 右侧 | Z |
| 47 | 右侧圆窗 | 260 | 右圆窗 | φ20 铣刀 | 右侧 | Z |
| 48 | 右侧凸台 1 | 48 | 右凸台 | φ25 铣刀 | 右侧 | Z |
| 49 | 右侧凸台 2 | 48 | 右凸台 | φ25 铣刀 | 右侧 | Z |
| 50 | φ10 孔 | 9 | 右凸台 1 | φ10 复合丝锥 | 右侧 | Z |
| 51 | φ10 孔 | 9 | 右凸台 2 | φ10 复合丝锥 | 右侧 | Z |
| 52 | 方窗右内壁 | 147 | 右方窗 | φ30 长杆铣刀 | 右侧 | Z |
| 53 | 方窗左内壁 | 147 | 右方窗 | φ30 长杆铣刀 | 右侧 | Z |
| 54 | 方窗 φ10 孔 | 5 | 右方窗 | φ10 复合丝锥 | 右侧 | Z |
| 55 | 方窗 φ10 孔 | 5 | 右方窗 | φ10 复合丝锥 | 右侧 | Z |
| 56 | 方窗 φ10 孔 | 5 | 右方窗 | φ10 复合丝锥 | 右侧 | Z |
| 57 | 方窗 φ10 孔 | 5 | 右方窗 | φ10 复合丝锥 | 右侧 | Z |
| 58 | 方窗 φ10 孔 | 5 | 右方窗 | φ10 复合丝锥 | 右侧 | Z |
| 59 | 方窗 φ10 孔 | 5 | 右方窗 | φ10 复合丝锥 | 右侧 | Z |
| 60 | 圆窗 φ10 孔 | 5 | 右圆窗 | φ10 复合丝锥 | 右侧 | Z |
| 61 | 圆窗 φ10 孔 | 5 | 右圆窗 | φ10 复合丝锥 | 右侧 | Z |
| 62 | 圆窗 φ10 孔 | 5 | 右圆窗 | φ10 复合丝锥 | 右侧 | Z |
| 63 | 圆窗 φ10 孔 | 5 | 右圆窗 | φ10 复合丝锥 | 右侧 | Z |
| 64 | 左侧方窗 | 379 | 左方窗 | φ50 铣刀 | 左侧 | Z |
| 65 | 左侧圆窗 | 260 | 左圆窗 | φ20 铣刀 | 左侧 | Z |
| 66 | 方窗 φ10 孔 | 5 | 左方窗 | φ10 复合丝锥 | 左侧 | Z |
| 67 | 方窗 φ10 孔 | 5 | 左方窗 | φ10 复合丝锥 | 左侧 | Z |
| 68 | 方窗 φ10 孔 | 5 | 左方窗 | φ10 复合丝锥 | 左侧 | Z |
| 69 | 方窗 φ10 孔 | 5 | 左方窗 | φ10 复合丝锥 | 左侧 | Z |
| 70 | 圆窗 φ10 孔 | 5 | 左圆窗 | φ10 复合丝锥 | 左侧 | Z |
| 71 | 圆窗 φ10 孔 | 5 | 左圆窗 | φ10 复合丝锥 | 左侧 | Z |
| 72 | 圆窗 φ10 孔 | 5 | 左圆窗 | φ10 复合丝锥 | 左侧 | Z |
| 73 | 圆窗 φ10 孔 | 5 | 左圆窗 | φ10 复合丝锥 | 左侧 | Z |

在安排表 1 中的任务时,必须保证同个工位中的所有任务具有相同的机床类型和加工方位类型。

4 箱体加工生产线规划

笔者以年产量 1.7×10^4 台 ~ 2.0×10^4 台为目标(工作周:50 周,每周工作 12 班次,每班次 8 h 计算),可得周产能目标为 330 套 ~ 390 套,按每周 6 天两班倒可得每班产能为 27 套 ~ 33 套。可将节拍时间(C)预设为 17 min ~ 20 min,针对此 TLBP 问题,将预定节拍时间细化为以 10 s 为级差的等差数列,采用粒子群算法进行运算,设置蚂蚁数目 10,运算代数 100。 m 为计算得到的工位数目(单位:个), LB 为平衡率。表 1 为 73 个加工任务的工艺需求表。相对于文献[17]增加了机床需求约束, M 表示高精度加工中心, Z 表示普通精度加工中心。

采用粒子群算法所得优化方案结果如表 2 所示。

表2 采用优化算法各节拍测试结果对比

Table 2 The comparison of test results of each beat was obtained by using optimization algorithm

| 序号 | CT | PSO | | | No | CT | PSO | | |
|----|-------|-----|-------|----------------|----|-------|-----|-------|----------------|
| | | m | LB/% | C _h | | | m | LB/% | C _h |
| 1 | 1 210 | 5 | 87.62 | 39 | 11 | 1 110 | 6 | 79.59 | 40 |
| 2 | 1 200 | 5 | 88.35 | 39 | 12 | 1 100 | 7 | 68.84 | 39 |
| 3 | 1 190 | 5 | 89.09 | 40 | 13 | 1 090 | 8 | 60.79 | 41 |
| 4 | 1 180 | 5 | 89.85 | 40 | 14 | 1 080 | 8 | 61.35 | 40 |
| 5 | 1 170 | 5 | 90.62 | 39 | 15 | 1 070 | 8 | 61.93 | 40 |
| 6 | 1 160 | 5 | 91.40 | 38 | 16 | 1 060 | 8 | 62.51 | 39 |
| 7 | 1 150 | 5 | 92.19 | 40 | 17 | 1 050 | 8 | 63.11 | 39 |
| 8 | 1 140 | 5 | 93.00 | 40 | 18 | 1 040 | 8 | 63.71 | 40 |
| 9 | 1 130 | 5 | 93.82 | 42 | 19 | 1 030 | 8 | 64.33 | 37 |
| 10 | 1 120 | 5 | 94.66 | 39 | 20 | 1 020 | 8 | 64.96 | 37 |

从表2中可得:当节拍时间为1 120 s时,整体加工线的平衡率最高,达到94.66%。表2中方案均能满足产能需求,但当节拍时间缩短为1 110 s或1 100 s之后,单班产能仅增加0.2台~0.5台,但加工线平衡率将下降15.07%~25.82%,造成设备和人员资源的

极大浪费,且因增设备台数,增加资产投入和人员成本,故节拍1 120 s为优选方案。

人工排产方案所得平衡率、工位数、换刀时间随预设节拍时间的变化如表3所示。

表3 人工排产各节拍结果对比

Table 3 Comparison of the results of each beat calculated by manual production scheduling

| 序号 | CT | Manual | | | No | CT | Manual | | |
|----|-------|--------|-------|----------------|----|-------|--------|-------|----------------|
| | | m | LB/% | C _h | | | m | LB/% | C _h |
| 1 | 1 210 | 6 | 73.02 | 46 | 11 | 1 110 | 7 | 68.22 | 50 |
| 2 | 1 200 | 6 | 73.62 | 48 | 12 | 1 100 | 8 | 60.24 | 48 |
| 3 | 1 190 | 6 | 74.24 | 51 | 13 | 1 090 | 8 | 60.79 | 46 |
| 4 | 1 180 | 6 | 74.87 | 45 | 14 | 1 080 | 8 | 61.35 | 52 |
| 5 | 1 170 | 6 | 75.51 | 48 | 15 | 1 070 | 8 | 61.93 | 45 |
| 6 | 1 160 | 6 | 76.16 | 50 | 16 | 1 060 | 8 | 62.51 | 44 |
| 7 | 1 150 | 6 | 76.83 | 51 | 17 | 1 050 | 8 | 63.11 | 41 |
| 8 | 1 140 | 6 | 77.50 | 49 | 18 | 1 040 | 8 | 63.71 | 46 |
| 9 | 1 130 | 6 | 78.19 | 47 | 19 | 1 030 | 9 | 57.18 | 46 |
| 10 | 1 120 | 6 | 78.88 | 49 | 20 | 1 020 | 9 | 57.75 | 48 |

从表3中可知:人工排产主要依靠经验而为,无法具备算法高速计算多次迭代收敛的优异性能。因此,人工排产效果较差,其最优的平衡率仅为78.88%。

粒子群算法所求得最高平衡率方案(节拍时间为1 120 s,平衡率为94.66%)的具体任务分配表如表4所示。

表4 粒子群算法节拍1 120 s方案优化结果

Table 4 Optimization results of ant colony (beat time 1 120 s)

| 序号 | 任务分配情况 | 换刀次数/时间 | 累计 |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------|
| 1 | 1(0,957),8(957,967),3(967,975),5(975,979),6(979,986),2(986,991),7(991,996),4(996,1000),10(1000,1002),11(1002,1009),9(1009,1013) | 7/14 | 1 013 |
| 2 | 12(0,742),13(742,841),14(841,926),29(926,933),19(933,941),20(941,947),21(947,953),28(953,960),27(960,965),18(965,973),26(973,977),24(977,984),22(984,989),23(989,994),25(994,999),15(999,1062),16(1062,1097),17(1097,1104) | 12/24 | 1 104 |
| 3 | 30(0,826),31(826,925),41(925,929),45(929,939),44(939,947),32(947,1032),43(1032,1042),34(1042,1050),38(1050,1056),40(1056,1062),36(1062,1068),37(1068,1074),39(1074,1080),42(1080,1090),33(1090,1098),35(1098,1104) | 9/18 | 1 104 |
| 4 | 47(0,262),49(262,312),48(312,360),51(360,371),61(371,376),63(376,381),46(381,762),55(762,769),56(769,774),60(774,779),57(779,784),59(784,789),58(789,794),50(794,803),52(803,952),53(952,1099),62(1099,1106),54(1106,1111) | 7/14 | 1 111 |
| 5 | 65(0,262),70(262,269),71(269,274),73(274,279),64(279,660),69(660,667),72(667,672),68(672,677),67(677,682),66(682,687),Finally Task(687,1047) | 4/8 | 1 047 |

表 4 中,笔者对每个工位中的每个任务加工起始时刻和加工完成时刻进行排列,同时提供该工位的换刀次数/换刀时间信息。

人工排产和优化算法排产所得工位数量对比图如图 7 所示。

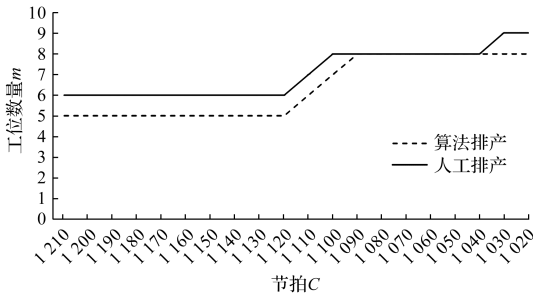


图 7 人工排产与优化算法排产工位数量对比

Fig. 7 Comparison of the number of workstations between manual scheduling and optimization algorithm scheduling

人工排产和优化算法排产所得平衡率对比图如图 8 所示。

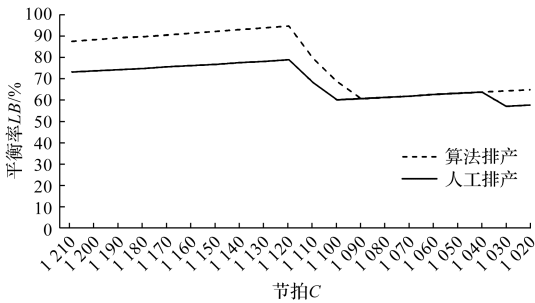


图 8 人工排产与优化算法排产平衡率对比

Fig. 8 Comparison of balance rate between manual scheduling and optimal scheduling

人工排产和优化算法排产所得换刀次数对比图如图 9 所示。

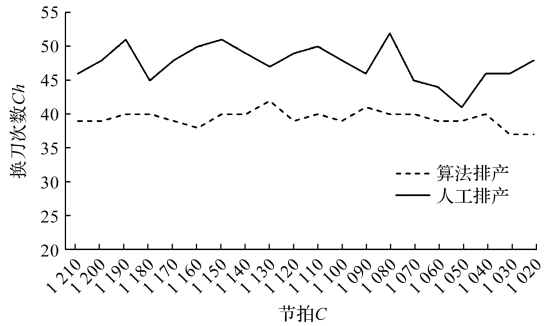


图 9 人工排产与优化算法排产换刀次数对比

Fig. 9 Comparison of tool change times between manual scheduling and optimal scheduling

对比图 7 ~ 图 9 可知:由于人工排产仅依靠经验,未能充分综合考虑换刀、加工方位、平衡率、工位数量等复杂约束条件的影响,在绝大多数情形下工位数量、整线平衡率和换刀次数三个关键指标均劣于优化算法的排产结果。

且全局较优解也由优化算法得到,因此也说明该优化算法能辅助工艺规划工程师工作的同时,且能得到综合指标更优的机加工生产线规划方案。

由表 4 所得加工任务编排甘特图如图 10 所示。

与图 10 零件属同族零件的相同节拍下任务安排甘特图如图 11 所示。

图 10 中,结尾任务 (finally task) 为去毛刺及最终检验任务。甘特图由算法生成,浅色任务表示加工该任务,需首先进行换刀作业,且浅色任务时间增加了平

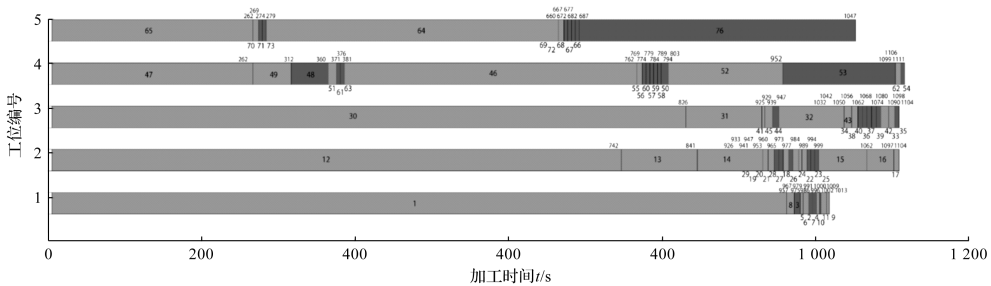


图 10 节拍时间 120 s 任务编排甘特图

Fig. 10 Task scheduling Gantt chart (beat time 120 s)

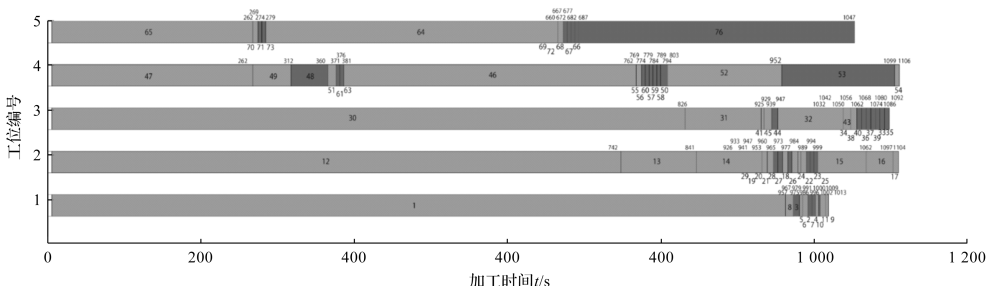


图 11 简化版零件节拍时间 120 s 任务编排甘特图

Fig. 11 Task scheduling Gantt chart for simplified version parts(beat time 120 s)

均换刀时间;深色任务表示不需要换刀作业,因此不含换刀时间。

从图10、图11可知:紧密约束任务3和8、12和13、30和31均成对的安排在工位1、工位2、工位3中,满足紧密约束条件;工位1中任务均满足机床类型M和加工方位为顶面的约束;工位2中任务均满足机床类型M和加工方位为前面的约束;工位3中任务均满足机床类型M和加工方位为后面的约束;工位4中任务均满足机床类型Z和加工方位为右侧的约束;工位5中任务均满足机床类型Z和加工方位为左侧的约束。

综上所述,图中任务编排均满足先后约束关系约束、加工方位约束、刀具约束、机床需求约束以及辅助任务约束,体现优化算法的实用性。

以上说明,笔者采用启发式备选任务集生成规则对标准粒子群算法进行改进后,能够很好地求解所研究的问题。

5 算法应用探讨

针对生产柔性问题,笔者以同族类零件和不同族零件两个角度进行分析:

1) 基于同一毛坯的同族类零件加工柔性分析。若本算例为包含完整机加工尺寸的零件,本族内其他零件尺寸区别仅限于加工尺寸数量的减少,且减少尺寸一般不影响留存尺寸的先后约束关系;则用于加工当前最全面尺寸零件的生产线构型和机床刀具方案具备优异的生产柔性,只需通过在每工位的机床中预留同族内不同零件的删减对应尺寸版数控代码,就可完美无缝地切换生产同族内其他类型零件。

2) 基于不同类型毛坯的异族类零件加工柔性分析。在采用优化算法的基础上,通过借鉴文献[11]中为两种不同类型箱体零件分别预设多种构型的平衡方案,进一步寻找两组方案中具备相同构型的平衡方案,作为柔性混流生产线的设计方案。也可实现基于构型不变的柔性生产线。但这种柔性生产线,由于两种箱体毛坯和加工尺寸存在较大差异,在切换线时,必然要更换工装和部分刀具,需要调整的时间相较于第一种柔性生产线会更多。

以上文所述的第1)种生产柔性为例,假设同族类零件相比于完整版零件减少任务42和62。只需将对应工位被简化的任务删除即可实现快速柔性切换目的(换刀时间需根据删除后前后任务刀具差异情形增减)。如图11所示为调整后的同族类简化加工版零

件产线甘特图,将工位3中的42号任务,以及工位4中的62号任务删除后所得。

由于被删除的42号任务所用刀具与原有甘特图中前任务39所需刀具不同,而39号却和原甘特图中42号后面的任务33所用刀具相同,因此删除42号任务后,任务39和33之间不需要换刀作业(33号任务在新甘特图中减去换刀时间后变为深色),因此切换线过程极为简便。由于被删除的62号任务在原甘特图中的前后任务所用刀具不同,因此删除62号之后原甘特图中54号任务须增加换刀时间,54号任务在新甘特图中变为浅色。

针对上文第2)种异族类零件之间的生产柔性,限于篇幅暂未提供详细的算例说明。

综上所述,笔者所提出的平衡优化算法,具备一定的生产柔性,可为多种类箱体零件的柔性生产线规划设计提供解决方案。

6 结束语

笔者研究了包含换刀、加工辅助、“或”和“紧密”约束、刀具需求、机床需求等复杂约束条件综合作用下的机加工生产线平衡问题,设计了一种粒子群算法,加工任务集的多重筛选机制满足以上复杂约束条件,通过粒子群基于位置权重的搜索策略进行了加工任务链的构建,并设计了甘特图自动生成模块;对某型复杂箱体的加工工艺案例进行了细致分析,分析其定位基准、评价基准并设计了其加工任务的优先顺序图,建立了合理的工艺约束条件;将该案例带入粒子群算法求解,验证了该算法的有效性和高效性。

结论如下:

1) 采用含有多重筛选机制的粒子群算法,对复杂零部件的机加工生产线规划问题能够得到多组高于90%平衡率解决方案;以节拍时间为120s的优化方案为优选方案,其平衡率为94.66%,换刀次数仅为39次,具有兼顾成本和效率的综合优势;

2) 能够在加工工艺规划和产能分析阶段进行详细的工位任务设计和生产设备需求的分析;

3) 具备一定的生产柔性,为制造业管理者提供更智能化的决策分析方法。

未来,笔者将进一步对更多复杂的实际约束条件进行研究,如机床加工参数限制条件、人员需求约束,从而为生产决策提供更精细的解决方案。

参考文献(References):

[1] 李爱平,鲁力,王世海,等.复杂箱体零件柔性机加工生

- 产线平衡优化[J]. 同济大学学报:自然科学版,2015,43(4):625-632.
- LI Ai-ping, LU Li, WANG Shi-hai, et al. Optimization of flexible machining line balancing for complex prismatic parts [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(4):625-632.
- [2] 彭功雳,胥云,廖映华,等. 主轴箱柔性生产线工序质量控制研究[J]. 机电工程,2021,38(12):1538-1545.
- PENG Gong-li, XU Yun, LAO Ying-hua, et al. Process quality monitoring of the flexible production line of the spindle box [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(12):1538-1545.
- [3] 张颖,张则强,曾艳清,等. 考虑人因的多目标拆卸线平衡问题及改进风驱动算法求解[J]. 计算机集成制造系统,2020,26(5):1172-1184.
- ZHANG Ying, ZHANG Ze-qiang, ZENG Yan-qing, et al. Improved wind driven optimization algorithm for multi-objective disassembly line balancing problem concerning human factors [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(5):1172-1184.
- [4] 张则强,蔡宁,曾艳清,等. 面向再制造的拆卸线平衡问题建模理论及求解方法综述[J]. 中国机械工程,2018,29(21):2636-2645.
- ZHANG Ze-qiang, CAI Ning, ZENG Yang-qing, et al. Review of modeling theory and solution method for disassembly line balancing problems for remanufacturing [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(21):2636-2645.
- [5] 胡俊逸,张则强,金初云. 求解双边装配线第二类平衡问题的一种蚁群算法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016,57(2):149-152.
- HU Jun-yi, ZHANG Ze-qiang, JIN Chu-yun. Ant algorithm for two-sided assembly line balancing of type-2 [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016, 57(2):149-152.
- [6] 张则强,胡俊逸,程文明. 第 I 类双边装配线平衡问题的改进蚁群算法[J]. 西南交通大学学报,2013,48(4):724-730.
- ZHANG Ze-qiang, HU Jun-yi, CHENG Wen-ming. Improved ant colony algorithm for two-sided assembly line balancing problem of type I [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(4):724-730.
- [7] 张则强,程文明,钟斌,等. 混合品种装配线平衡问题的一种混合搜索机制的蚁群算法[J]. 机械工程学报,2009,45(5):95-101.
- ZHANG Ze-qiang, CHENG Wen-ming, ZHONG Bin, et al. Hybrid behavior ant colony optimization for mixed-model assembly line balancing problem [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5):95-101.
- [8] 文笑雨,孙海强,魏新龙,等. 绿色制造模式下多目标柔性工艺规划问题研究[J]. 机械设计与制造,2019,56(5):222-227,231.
- WEN Xiao-yu, SUN Hai-qiang, WEI Xin-long, et al. Research on multi-objective flexible process planning under green manufacturing mode [J]. Machinery Design & Manufacture, 2019, 56(5):222-227, 231.
- [9] 张雷,赵希坤,蒋诗新,等. 低碳低成本约束下箱体零件加工路线优化方法[J]. 中国机械工程,2018,29(23):2836-2844.
- ZHANG Lei, ZHAO Xi-kun, JIANG Shi-xin, et al. Optimization method of process routes for housing parts under low-carbon and low-cost constraints [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(23):2836-2844.
- [10] OSMAN H, BAKI M F. Balancing transfer lines using benders decomposition and ant colony optimization techniques [J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(5-6):1334-1350.
- [11] 张恒,李爱平,傅翔,等. 面向混批加工的装夹方案选择与线平衡集成优化方法[J]. 中国机械工程,2019,30(20):2497-2504.
- ZHANG Heng, LI Ai-ping, FU Xiang, et al. An integrated optimization method for setups planning and line balancing of mixed model transfer lines [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(20):2497-2504.
- [12] BORISOVSKY P. Genetic Algorithm for One Machining Line Balancing Problem with Setup Times [C]//2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), IEEE, 2020:1-5.
- [13] ESSAFI M, DELORME X, DOLGUI A. Balancing lines with CNC machines: a multi-start ant based heuristic [J]. Crip Journal of Manufacturing Science & Technology, 2010, 2(3):176-182.
- [14] 李爱平,王世海,芮云冬,等. 基于装夹选择的缸体零件柔性机加工生产线平衡优化[J]. 计算机集成制造系统,2016,22(5):1254-1263.
- LI Ai-ping, WANG Shi-hai, RUI Yun-dong, et al. Setups planning based optimization for cylinder machining line balancing [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(5):1254-1263.
- [15] 章正伟. 双螺杆压缩机端盖加工工艺规程规划的蚁群算

- 法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015, 56(12):116-120,123.
- ZHANG Zheng-wei. Study of ant colony algorithm for double screw compressor end cover machining process planning [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015, 56(12):116-120,123.
- [16] 刘雪梅,贾勇琪,兰琳琳,等. 基于多目标遗传算法的柔性加工线平衡优化[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2016,44(12):1910-1917.
- LIU Xue-mei, JIA Yong-qi, LAN Lin-lin, et al. Optimization of line balancing for flexible machining lines based on multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44 (12): 1910-1917.
- [17] HU Jun-yi, ZHANG Ze-qiang, QIU Hai-xuan, et al. Enhanced hybrid Ant colony optimization for machining line balancing problem with compound and complex constraints [J]. Applied Sciences, 2022,12(9):4200.
- [18] 阎长罡,李松,刘宇. 基于粒子群优化算法的圆锥刀侧铣刀轴轨迹规划[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(10):2380-2388.
- YAN Chang-gang, LI Song, LIU Yu. Tool axis trajectory planning for flank milling with conical tools based on particle swarm optimization [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(10):2380-2388.
- [19] 解占新,闫玺铃,陆春月. 面向订单的混流装配线多目标调度研究[J]. 机电工程, 2021, 38(5):580-586.
- XIE Zhan-xin, YAN Xi-ling, LU Chun-yue. Multi-objective scheduling of order oriented mixed flow production line[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(5):580-586.
- [20] 赵世豪,杜小强. 并联式太阳跟踪机构设计与尺寸优化[J]. 轻工机械, 2023, 41(4):82-90.
- ZHAO Shi-hao, DU Xiao-qiang. Design and size optimization of parallel sun tracking mechanism[J]. Light Industry Machinery, 2023, 41(4):82-90.
- [21] XU Yang, HONG Ru-li. Evolutionary-state-driven multi-swarm cooperation particle swarm optimization for complex optimization problem [J]. Information Sciences, 2023, 646(10):119302.

本文引用格式:

金初云,胡俊逸,陈勇,等. 某型复杂工程机械变速箱体复合工艺约束机加工线平衡研究[J]. 机电工程, 2024, 41(4):720-731.

JIN Chuyun, HU Junyi, CHEN Yong, et al. Machining line balance of variable speed box of a complex construction machinery considering complex process constraints[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 41(4):720-731.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>